



Авторы:
к.т.н. В.Н. Козлов,
к.т.н. М.И. Петров,
«НПП Бреслер»,
г. Чебоксары.

ДУГОГАСЯЩИЕ РЕАКТОРЫ В СЕТЯХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Аннотация: рассмотрены вопросы компенсации емкостных токов замыкания на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью. Приведены основные виды электрооборудования, применяемого для решения этой задачи, и его производители. Рассмотрены достоинства и недостатки аппаратов для компенсации емкостных токов замыкания на землю.

Ключевые слова:
однофазные замыкания на землю, дугогасящий реактор,
резонанс, контур нулевой последовательности сети.

Наиболее частым видом повреждений в линиях электропередачи являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). Одно из основных достоинств сетей с изолированной нейтралью – возможность сохранения их в работе при этом виде повреждений. Основным критерием, вынуждающим все же отключать потребителей в режиме ОЗЗ, является величина тока в месте замыкания, приводящая к возникновению устойчивой дуги и, как следствие, тяжелым авариям.

Один из вариантов решения проблем ликвидации ОЗЗ предложен в 1916 году Петерсоном [1], который заключается в отводе емкостных токов от места замыкания посредством специальных индуктивностей – дугогасящих катушек (ДГК) или дугогасящих реакторов (ДГР). Включение ДГР кроме снижения тока в месте замыкания приводит к увеличению времени восстановления напряжения на поврежденной фазе, что способствует восстановлению диэлектрических свойств изоляции в месте повреждения. Одним из главных преимуществ сетей с компенсацией емкостных токов является снижение кратности перенапряжений в случае дуговых замыканий, до $2,4 - 2,6 U_{\phi}$ (U_{ϕ} – фазное напряжение сети) при резонансной настройке контура нулевой последовательности сети. В условиях развития сетей и изменения их конфигурации поддержание резонансной настройки требует новых подходов к автоматике управления ДГР [2].

Значения емкостных токов, при превышении которых требуется компенсация и условия выбора дугогасящих аппаратов, приведены в руководящих документах (РД) [3]. В настоящее время, с целью повышения эффективности эксплуатации электрических сетей, компенсацию применяют при токах, существенно меньших рекомендованных ПУЭ и ПТЭ.

В условиях современной тенденции заме-

ны кабелей с маслонаполненной изоляцией на пластмассовую (СПЭ) увеличиваются емкости относительно земли и актуальность задачи компенсации емкостных токов постоянно нарастает. В частности, этот факт отражен в Положении о технической политике в распределительном электросетевом комплексе, утвержденном 25 октября 2006 г. распоряжением председателя Правления ОАО «ФСК ЕЭС» [4], в котором определено, что «при новом строительстве, расширении и реконструкции сетей напряжением 6-35 кВ необходимо рассматривать варианты проектных решений сети с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор с автоматической компенсацией емкостных токов».

Схемы включения ДГР

Принципиально ДГР должны быть установлены в каждой фазе сети (рис. 1). При таком техническом решении катушка, подключенная к конкретной фазе, компенсирует емкостный ток замыкания на землю этой фазы.

Высокая стоимость трехфазной системы компенсации емкостных токов, ее громоздкость и технические сложности в пофазной настройке дугогасящих реакторов привели к тому, что наибольшее распространение получило решение с установкой одного ДГР в нейтраль сети (рис. 2). Однако такое решение требует наличия явно выраженной нейтрали сети, которая не всегда имеется. На рис. 2 ДГР подключен к сети посредством специального нейтралеобразующего трансформатора TN.

Принципиально добиться компенсации емкостного тока сети можно как изменением индуктивности ДГР, так и изменением добавочной емкости C_d , устанавливаемой параллельно ДГР (рис. 2). Однако на практике существует целый ряд сложностей в управлении высоковольтными конденсаторными установками. Кроме того, наличие дополнительного контура, образуемого емкостью C_d и индуктивностью рассеяния трансформатора TN, создает предпосылки к воз-

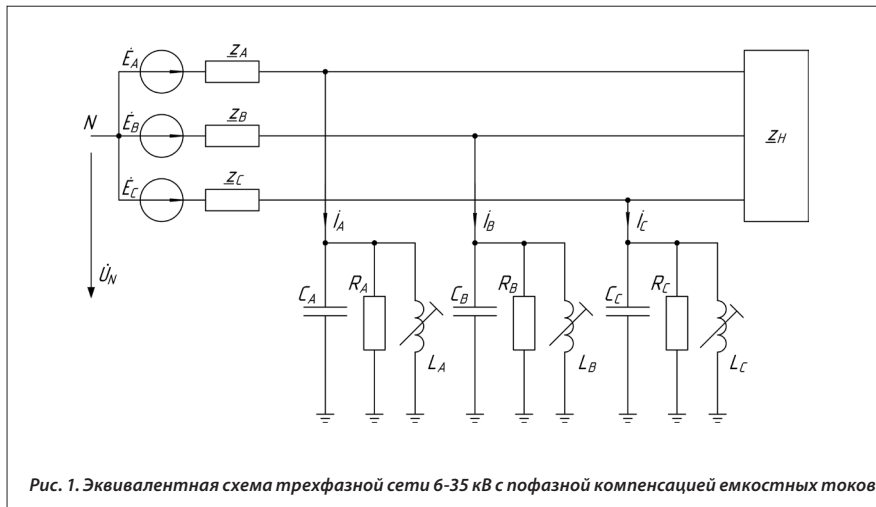


Рис. 1. Эквивалентная схема трехфазной сети 6-35 кВ с фазовой компенсацией емкостных токов

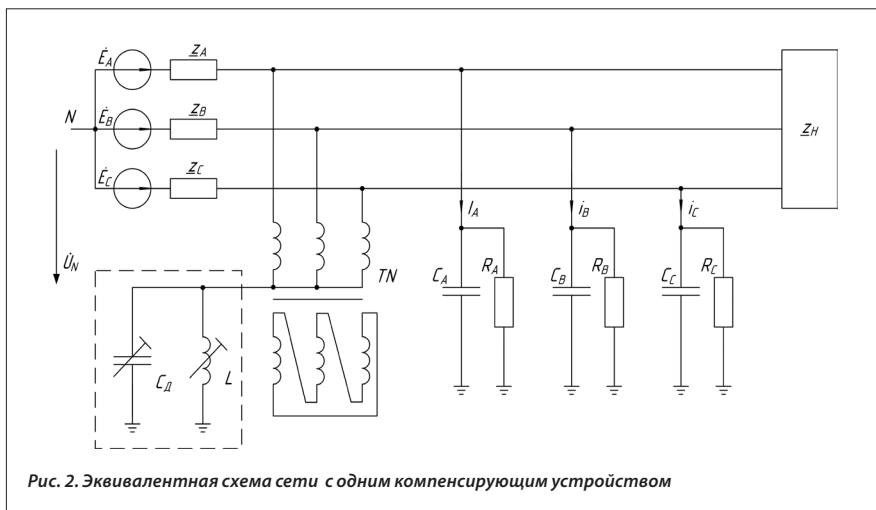


Рис. 2. Эквивалентная схема сети с одним компенсирующим устройством

никновению коммутационных перенапряжений на ДГР. Поэтому в настоящее время, в основном, применяются только управляемые дугогасящие реакторы.

Мощность ДГР в схеме (рис. 2) должна быть не меньше суммарной реактивной мощности фазных емкостей CA, CB, CC сети. Как правило, мощность ДГР выбирается с учетом перспективного развития сетей и возможности компенсации емкостных токов одним реактором при объединении секций шин (СШ) и выводе в ремонт реактора другой СШ. В [5] приводятся расчет мощности и выбор дугогасящих аппаратов. Некоторые положения этого документа во многом устарели. В частности, рекомендация в установке двух и более ДГР при емкостных токах более 50 А.

Нейтралеобразующие устройства

Трансформаторы, используемые для создания искусственной нейтрали с целью присоединения к ней ДГР, принято называть нейтралеобразующими, подземляющими, присоединительными или фильтрами нулевой последовательности. Последнее название подчеркивает тот факт, что реактор при ОЗЗ создает контур для протекания токов нулевой последовательности сети.

В качестве таких присоединительных трансформаторов могут применяться любые трехфазные трансформаторы соответствующей мощности. Первичные обмотки трансформатора должны быть соединены в «звезду» с выведенной нейтралью, к которой и

подсоединяется ДГР. Кроме того, необходимо наличие вторичных обмоток, соединяемых в замкнутый «треугольник», что обеспечивает малое сопротивление трансформатора токам нулевой последовательности сети.

Малого сопротивления токам нулевой последовательности сети можно также добиться соединением обмоток трансформатора в «зигзаг» [6]. Первичная обмотка такого трансформатора разбита на две равные части, которые соединяются последовательно встречно с половинкой обмотки другой фазы (рис. 3). В результате такого соединения суммарное количество витков, приходящихся на одну фазу, в 1,15 раза больше, чем в аналогичной обмотке при соединении просто в «звезду». Однако отсутствие необходимости во вторичной обмотке, соединяемой в замкнутый «треугольник», делает такое решение экономически оправданным для задачи искусственного создания нейтрали. Такие трансформаторы получили название – фильтры нулевой последовательности (ФЗМО). Серийно ФМЗО мощностью от 200 до 1600 кВАр выпускает ОАО «РЭТЗ Энергия».

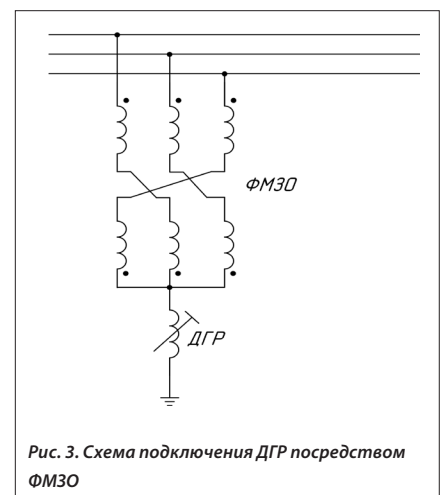


Рис. 3. Схема подключения ДГР посредством ФМЗО

Если силовые трансформаторы (Т на рис. 4) или трансформаторы собственных нужд сети имеют подходящее соединение вторичных обмоток, ДГР может быть подключен непосредственно к их нейтрали. В этом случае

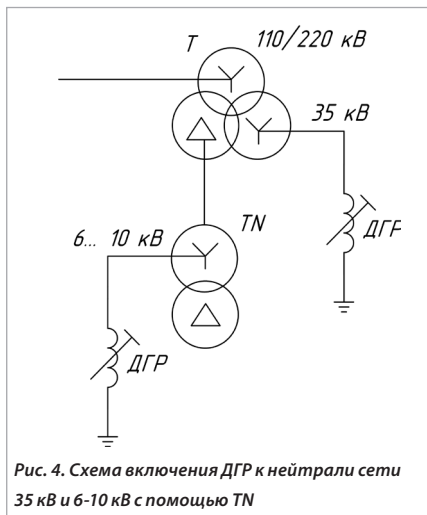


Рис. 4. Схема включения ДГР к нейтрали сети 35 кВ и 6-10 кВ с помощью TN

мощность реактора не должна превышать 7-10% номинальной мощности трансформатора.

Для компенсации емкостных токов в сети генераторного напряжения дугогасящий реактор можно подключать к нейтральной точке генератора G (рис. 5).

В качестве нейтралеобразующих трансформаторов могут применяться силовые масляные трансформаторы серий ТМ, ТМА, ТМГ с выведенной нейтралью и соединенной в «треугольник» вторичной обмоткой (TN на рис. 4). Все производители трансформаторного оборудования принимают заказы и на поставку этого оборудования. При проектировании системы компенсации ем-

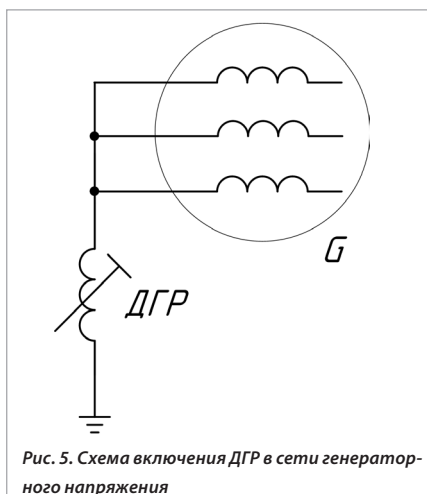


Рис. 5. Схема включения ДГР в сети генераторного напряжения

костных токов необходимо обратить внимание на влияние сопротивления TN на выбор величины тока ДГР [5]. Истинное значение тока реактора можно рассчитать по формуле:

$$I_{ДГР} = I_L \frac{X_L}{X_L + 0,33X_{TN}}$$

где: I_L – максимальное паспортное значение тока реактора; X_L – минимальное значение индуктивного сопротивления ДГР в заданном диапазоне регулирования; X_{TN} – эквивалентное сопротивление TN токам нулевой последовательности. Последнее рассчитывается по формуле:

$$X_{TN} = \frac{U_K * U_{НОМ}^2}{100 * S_{НОМ}}$$

где: U_K , $U_{НОМ}$ и $S_{НОМ}$ – соответственно, напряжение короткого замыкания трансформатора (паспортное значение в %) TN, номинальное напряжение и мощность трансформатора.

Дугогасящие реакторы

Дугогасящие реакторы выпускаются регулируемого и нерегулируемого исполнения. Регулируемые ДГР нашли широкое применение в распределительных сетях 6-35 кВ. По принципу регулирования ДГР подразделяются на ступенчато- и плавнорегулируемые. К первому типу относятся катушки типа ЗРОМ, РЗДСОМ и эксплуатируемые в СССР с 50-60 гг. XX века реакторы типа СЕУФ (ГДР). В настоящее время данный тип реакторов практически не выпускается. Плавнорегулируемые представлены плунжерными реакторами, в которых регулирование индуктивности производится изменением немагнитного зазора сердечника и ДГР с подмагничиванием сердечника, за счет которого изменяется рабочая точка на нелинейной характеристике магнитопровода, а следовательно, и индуктивность реактора. Попытки избавиться от основного недостатка плунжерных реакторов – наличия механического привода, привели к появлению в СССР в 60-80 гг. XX века большого количества разнообразных ДГР с подмагничиванием от внешнего источника продольного, поперечного и смешанного возбуждения. Однако

большая потребляемая мощность, малый диапазон регулирования тока компенсации, наличие высших гармонических в токе рабочей обмотки, сложность автоматического управления сделали этот тип ДГР неконкурентоспособным на рынке электрооборудования. Большая часть этих реакторов демонтирована, а остальная постепенно выводится из эксплуатации. В настоящее время в ДГР со смешанным возбуждением выпускает серийно только Кентауский завод трансформаторов (Казахстан).

В практике других стран ДГР с подмагничиванием даже не рассматриваются как альтернатива плунжерным реакторам. Единственным предприятием в России, выпускающим ДГР с подмагничиванием (типа РУОМ), является ОАО «РЭТЗ Энергия», г. Раменское, Московская область.

К дугогасящим реакторам с плавным регулированием индуктивности предъявляются следующие основные требования:

- линейность регулировочной характеристики;
- линейность ВАХ, отклонение, не более 2%;
- процент высших гармонических составляющих в токе реактора, не более 2%;
- добротность аппарата Q, не менее 50;
- глубина регулирования, не менее 3;
- возможность дистанционного управления без отключения от сети.

Технические параметры плунжерных ДГР, поставляемых в электрические сети России, приведены ниже.

Конструкция ДГР

Большинство ДГР, эксплуатируемых в электрических сетях России, выпускаются в двух- и трехстержневом исполнении (рис. 6). Двухстержневая конструкция характерна для ступенчато-регулируемых реакторов и реакторов серии РУОМ. Обе половинки рабочей обмотки реакторов соединяются параллельно. На стержнях дополнительно наматываются сигнальная обмотка и обмотка управления. Последняя рассчитывается на подключение активного сопротивления для снижения добротности контура нулевой последовательности сети.

Основное отличие магнитных си-

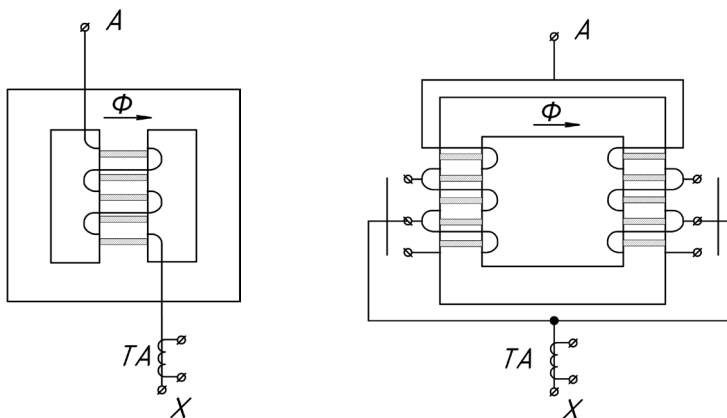


Рис. 6. Конструктивное исполнение ДГР

Степенчатое исполнение стержней реакторов РЗДСОМ и РУОМ состоит в том, что стержни ступенчатого ДГР имеют по 6-8 немагнитных зазоров, равномерно расположенных по длине. Общая высота зазоров составляет 6-8 см. Наличие зазоров позволяет линеаризовать вольтамперную характеристику реактора, нелинейность которой не должна выходить за рамки допустимых значений к статическим аппаратам этого типа (не более $\pm 2\%$).

Плунжерные дугогасящие реакторы, в основном, имеют трехстержневую конструкцию магнитопровода. Регулирование индуктивного тока осуществляется изменением высоты немагнитного зазора в центральном стержне (рис. 7). Для этого центральный стержень разрезается на 2 части. Возможны два варианта регулирования индуктивности катушки: симметричное, когда зазор изменяется одновременно в обе стороны относительно центральной оси А сердечника, и несимметричное – подвижной является лишь одна часть сердечника. В первом случае характеристика регулирования ДГР более плавная, чем во втором.

Минимальный зазор определяет величину минимального тока реактора. Максимальный зазор рассчитывается по величине максимального тока реактора из условия 2-часовой непрерывной работы ДГР. Отношение максимального тока реактора к минимальному называют кратностью

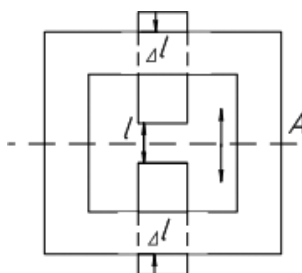


Рис. 7. Схема магнитопровода плунжерного реактора

регулирования тока K_p .

Для снижения потерь в катушке и магнитопроводе мощные ДГР серии РЗДПОМ выполняются пятистержневыми (четырёхлучевая звезда). Самые совершенные реакторы ASR и ZTC фирмы EGE выполняются по схеме симметричная шестилучевая звезда. Такое конструктивное исполнение магнитопровода позволило минимизировать потери в стали, в том числе за счет упорядочивания потоков рассеяния в немагнитных зазорах.

Для снижения потерь в катушке и магнитопроводе мощные ДГР серии РЗДПОМ выполняются пятистержневыми (четырёхлучевая звезда). Самые совершенные реакторы ASR и ZTC фирмы EGE выполняются по схеме симметричная шестилучевая звезда. Такое конструктивное исполнение магнитопровода позволило минимизировать потери в стали, в том числе за счет упорядочивания потоков рассеяния в немагнитных зазорах.

Производители дугогасящих реакторов

Плунжерные катушки, за исключением России и стран СНГ, выпускают в пяти странах мира: Чехия (EGE); Австрия и Канада (подразделения TRENCH); Китай (YUNFA) и Индия.

В СНГ производством ДГР плунжерного типа заняты предприятия: ОАО «Белэнергоремналадка» (Белоруссия), ООО «ЭЛИЗ» (г. Запорожье, Украина), ОАО «Электрозавод» (г. Москва), ЦРМЗ филиал ОАО «Мосэнерго» (г. Москва), ООО ВП «НТБЭ» (г. Екатеринбург) и ОАО «Свердловэлектроремонт» (г. Екатеринбург).

В таблице 1 приведен список изготовителей и поставщиков плавнорегулируемых ДГР в энергетику России. ОАО «Электрозавод», предприятия EGE и фирма TRENCH выпускают реакторы для электрических сетей класса напряжения 6, 10, 20 и 35 кВ. Единственным предприятием, поставляющим ДГР сухого исполнения для закрытых подстанций, является фирма TRENCH.



Таблица 1. Производители дугогасящих реакторов

Тип реактора	РДМР	РЗДПОМ	РУОМ	ASR, ZTC	TRENCH
Производитель	Свердлов-евроэлектроремонт, ВП «НТБЭ»	Белэлектроремонт, «ЭЛИЗ», Электрозавод, ЦРМЗ Мосэнерго	ОАО РЭТЗ «Энергия»	EGE (Чехия), ООО «ЭНЕРГАН» (дилер EGE)	TRENCH (Австрия), НПО «ТехноСервис-Электро» (дилер TRENCH)
Охлаждение	Масляное	Масляное	Масляное	Масляное	Масляное, Сухое
Исполнение	Одинарное	Одинарное	Одинарное	Одинарное, Комбинированное	Одинарное, Комбинированное
Класс напряжения, кВ	6, 10	6, 10, 20, 35	6, 10	6, 10, 20, 35	6, 10, 20, 35
Кратность регулирования	8-25	5	10	10	10
Диапазон мощностей, кВА	300-820(1520)	120-1520	90-1520	50-8000	100-1000

EGE и TRENCH предлагают к поставке дугогасящие аппараты комбинированного исполнения, представляющие собой нейтралеобразующий трансформатор (ФМЗО) и дугогасящий реактор, установленные в одном маслонаполненном баке. Однако их применение в отечественной практике не соответствует

нормативным документам, так, в п. 6.1 «Типовой инструкции...» [4] говорится, что «включение или отключение трансформаторов, предназначенных для подключения дугогасящих реакторов, допускается производить только при отключенном дугогасящем реакторе (разъединитель в цепи реактора должен быть отключен)».

Таблица 2. Электрические параметры дугогасящих реакторов серии РДМР

НАИМЕНОВАНИЕ ПАРАМЕТРА	РЕАКТОРЫ							
	РДМР-300/6	РДМР-485/10	РДМР-360/6	РДМР-610/10	РДМР-440/6	РДМР-730/10	РДМР-490/0	РДМР-820/10
1. Номинальное напряжение основной обмотки, кВ	6,6/√3	10,5/√3	6,3/√3	10,5/√3	6,3/√3	10,5/√3	6,3/√3	10,5/√3
2. Максимальное допустимое напряжение основной обмотки, кВ	6,6/√3	11/√3	6,6/√3	11/√3	6,6/√3	11/√3	6,6/√3	11/√3
3. Пределы регулирования тока, А	15-80	10-80	5-100	5-100	6-120	6-120	7-135	7-135



Козлов Владимир Николаевич,

родился 15.08.1952 г. Окончил Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова в 1975 г., кафедра «Электрические аппараты». В 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию в Ленинградском политехническом институте на тему «Комплексная защита судовых генераторов». Доцент кафедры «ТОЭРЗА» Чувашского госуниверситета, главный конструктор ООО «НПП Бреслер».

Тип реактора	Номинальное напряжение, кВ	Наибольшее рабочее напряжение, кВ	Предельные токи при номинальном напряжении, А	Потери суммарные, не более, кВт
РЗДПОМ-120/6 У1	6,6/√3	7,2/√3	26,2 – 5,2	2,5
РЗДПОМ-300/6 У1	6,6/√3	7,2/√3	65,5 – 13,1	6,25
РЗДПОМ-190/10 У1	11/√3	12/√3	25,0 – 5,0	4,0
РЗДПОМ-480/10 У1	11/√3	12/√3	63,0 – 12,6	10,0
РЗДПОМ-480/20 У1	22/√3	24/√3	31,4 – 6,3	10,0
РЗДПОМ-480/20 У1	15,75/√3	17,1/√3	44,0 – 8,8	10,0
РЗДПОМ-700/35 У1	38,5/√3	40,5/√3	28,4 – 5,7	15,75

Таблица 3. Электрические параметры дугогасящих реакторов серии РЗДПОМ

Тип реактора	Мощность реактора, кВА	Номинальное напряжение сети, кВ	Номинальное напряжение реактора, А	Диапазон тока компенсации, А
ZTC 50	100	6	3,46	6 – 30
ZTC 50	190	6	3,46	11 – 55
ZTC 250	300	6	3,46	17 – 87
ZTC 250	480	6	3,46	28 – 139
ZTC 50	100	10	5,77	3 – 17
ZTC 50	190	10	5,77	6 – 33
ZTC 250	300	10	5,77	10 – 52
ZTC 250	480	10	5,77	17 – 83

Таблица 4. Электрические параметры дугогасящих реакторов серии ZTC (EGE)

Тип реактора	Мощность реактора, кВА	Номинальное напряжение сети, кВ	Номинальное напряжение реактора, А	Диапазон тока компенсации, А
ASR 1.0	840	6	3,46	48 – 243
ASR 1.6	1520	6	3,46	44 – 439
ASR 1.0	840	10	5,77	29 – 145
ASR 1.6	1520	10	5,77	52 – 263
ASR 1.0	1010	35	20,2	10 – 50
ASR 1.6	1620	35	20,2	16 – 80
ASR 2.0	2020	35	20,2	20 – 100
ASR 2.6	2500	35	20,2	24 – 124

Таблица 5. Электрические параметры дугогасящих реакторов серии ASR (EGE)



Петров Михаил Иванович,

родился 07.10.1956 г. Окончил Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова в 1979 г., кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий». В 1994 г. защитил кандидатскую диссертацию в Московском энергетическом институте на тему «Совершенствование средств компенсации емкостных токов замыкания на землю». Доцент кафедры «ЭСПП им А.А. Федорова» Чувашского госуниверситета, главный специалист по режимам нейтрали ООО «НПП Бреслер».

	Виды ДГР		Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток, А	Номинальная мощность, кВАр
Одиночный дугогасящий реактор	Работающие длительно	ETD	6-10-35	5-500	100-1000
	Работающие кратковременно	ETK	6-10-35	5-500	100-1000
	С сухой изоляцией/ длительно	EDD	6-10-35	5-500	100-1000
	С сухой изоляцией/ кратковременно	EDK	6-10-35	5-500	100-1000
	Длительно	END	6-10-35	5-500	100-1000
	Кратковременно	ENK	6-10-35	5-500	100-1000
	Со ступенчатым регулированием/ длительно	ESD	6-10-35	5-500	100-1000
	Со ступенчатым регулированием/ кратковременно	ESK	6-10-35	5-500	100-1000
Трансформаторный агрегат (дугогасящая катушка и подземающий трансформатор в одном корпусе)	Работающие длительно	ELD	6-10-35	5-500	100-1000
	Работающие кратковременно	ELK	6-10-35	5-500	100-1000

Таблица 6. Электрические параметры дугогасящих реакторов фирмы TRENCH

Все ДГР, приведенные в таблицах, имеют две дополнительные вторичные обмотки: сигнальную (с номинальным напряжением 100 В) и управления. У отечественных реакторов обмотка управления рассчитана на 220 В, у зарубежных – 500 В.

Выводы.

1. В настоящее время наиболее перспективным типом дугогасящих аппаратов в сетях 6...35 кВ являются плунжерные реакторы.
2. На отечественном рынке представлен достаточно широкий выбор плунжерных ДГР.

Литература:

1. Petersen W. Neutralizing of ground fault current and suppression of ground fault arcs through the ground fault reactor. E.T.Z., 1919.
2. Козлов В.Н., Петров М.И. Дугогасящие катушки и автоматика управления ими./ Релейная защита и автоматизация. – 2010. - №01(00). – С.20-25.
3. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. – СПб: Изд-во «Деан», 2000. – 352 с.
4. Князев В., Боков Г. Техническая политика ФСК. Требования к распределительному электросетевому комплексу // Новости ЭлектроТехники. – 2006. - №6 (42). – С. 22-26.
5. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ. РД 34.20.179. Утверждено Главным научно-техническим управлением энергетики и электрификации 06.06.87 г.
6. Каминский Е.А. Звезда, треугольник, зигзаг. Энергия, 1973. 104 с.